

УДК 519.87:532.525.3

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПЫЛЕНИЯ ВОДОУГОЛЬНОГО ТОПЛИВА ПНЕВМОМЕХАНИЧЕСКИМИ ФОРСУНКАМИ

Ю.А. Сенчурова, В.И. Мурко, В.И. Федяев\*, Д.А. Дзюба\*, Е.М. Пузырев\*\*

ФГУП НПЦ «Экотехника», г. Новокузнецк

E-mail: ecotechnika@nvkz.net

\*ЗАО НПЦ «СибЭкотехника», г. Новокузнецк

E-mail: ecotechnika@nvkz.net

\*\*ООО «Вихревые технологии сжигания», г. Барнаул

*Представлены результаты исследований распыления водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками. Показано, что при распылении топлива образуются две качественно различные системы капель. Первая система с «каплями» диаметром свыше 80...100 мкм представлена угольными частицами; остальное – водоугольными каплями.*

Развитие энергетики, а также повышение энергетической безопасности России в значительной степени зависят от широкого и эффективного использования угля в качестве энергетического топлива. Для этого необходимо, в первую очередь, улучшить потребительские свойства угля как энергетического топлива, а также освоить получение на основе угля альтернативных топлив при замене дефицитных природных ресурсов: газообразного и жидкого нефтяного топлива. Для решения вышеуказанной проблемы весьма перспективны проводимые как в России, так и за рубежом работы по технологии получения и использования угольных суспензий, которые представляют собой композиционную дисперсную систему, состоящую из твердой фазы в виде мелкодисперсного угля и жидкой среды (вода, спирты, углеводороды, продукты переработки нефти) [1, 2]. Наиболее изученной и перспективной в энергетике является водоугольная суспензия – водоугольное топливо (ВУТ), в которой основную часть жидкой среды составляет вода.

Эффективность горения ВУТ существенно зависит от качества распыления топлива. Поэтому актуальным представляется более полное раскрытие механизмов дробления и горения капель ВУТ.

В работе Г.Н. Делягина [3] отмечается, что горение водоугольного топлива существенно отличается от аналогичного процесса при использовании пылевидного угля. При этом утверждается, что на температуру воспламенения и устойчивость горения практически не оказывает влияния марка угля. Однако результаты практического применения ВУТ показывают, что для получения водоугольного топлива целесообразно использовать малометаморфизованные каменные угли с высоким выходом летучих веществ угля. При этом высокая теплота сгорания и высокое содержание летучих веществ в исходном угле позволяют более эффективно преодолевать инертное влияние высокой влажности.

На наш взгляд механизмы воспламенения и горения полидисперсного потока капель ВУТ необходимо рассматривать с учетом законов тепломассообмена и химических реакций, происходящих в жидкоугольных каплях и обычных угольных частицах.

Предполагается, что при распылении водоугольного топлива образуется поток полидисперсных капель, содержащий чисто угольные частицы, «освобожденные» за счет высокой скорости от жидкой фазы, и прилипшие к их поверхности тонкие угольные частицы. При этом в зависимости от гранулометрического состава угля в ВУТ, количество чисто угольных частиц может достигать 25...30 %.

Распыление водоугольного топлива воздухом или водяным паром осуществляется в два этапа. На первом этапе происходит дробление струи ВУТ за счет кинетической энергии распыляющего агента. На втором этапе при разгоне топлива осуществляется их дробление за счет сил сопротивления, оказываемого окружающей газовой средой, скорость движения которой многократно меньше скорости движения капель. В результате возникающего динамического воздействия капли расплющиваются и разрываются на более мелкие.

Рассмотрим механизм дробления капель ВУТ по аналогии с мазутным топливом [4].

Давление газовой среды  $P_1$  на движущуюся в ней каплю определяется воздействием силы трения  $F_{mp}$  на лобовую площадь капли  $S_k$ :

$$P_1 = \frac{F_{mp}}{S_k}. \quad (1)$$

Пренебрегая силой тяжести и рассматривая лишь действие газовой среды, получаем, что сила трения равна:

$$F_{mp} = \psi S_k \rho V_r^2, \quad (2)$$

где  $\psi$ ,  $\rho$  – коэффициент сопротивления и плотность газовой среды,  $V_r$  – относительная скорость капли по отношению к газовой среде.

Подставляя выражение (2) в ур. (1), получим:

$$P_1 = \psi \rho V_r^2.$$

С другой стороны, давление, испытываемое каплей за счет сил поверхностного натяжения, составляет

$$P_2 = \frac{2\sigma}{r_k},$$

где  $\sigma$  — коэффициент поверхностного натяжения,  $r_k$  — радиус капли.

Предполагается, что распад капли на более мелкие [4] происходит, если

$$P_1 > P_2. \quad (3)$$

В этом случае, максимальный размер капли получается при условии  $P_1 = P_2$ , т. е.

$$V_r^2 = \frac{2\sigma}{r_k}. \quad (4)$$

Из выражения (4) находим:

$$r_k = \frac{2\sigma}{\psi \rho V_r^2}. \quad (5)$$

Из формулы (5) видно, что диаметр капель ВУТ существенно зависит от поверхностного натяжения, плотности среды и относительной скорости движения капли. Причем, при повышении температуры, когда вязкость уменьшается, и повышении скорости обтекания тонкость распыления жидкого топлива увеличивается.

На рис. 1 показана расчетная зависимость диаметра распыленных капель ВУТ от скорости движения капель.

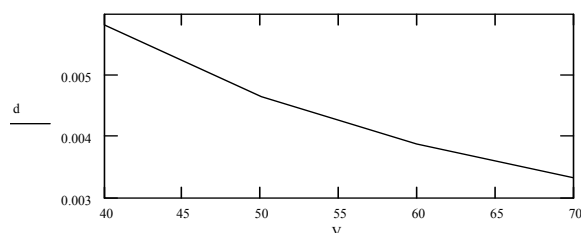


Рис. 1. Зависимость диаметра распыленных капель от скорости их движения

Как видно из рис. 1, при увеличении скорости движения капли ее диаметр уменьшается. Расчеты проводились для значений  $\sigma=0,060$  кг/с<sup>2</sup>,  $\psi=0,2$ ,  $\rho=1,29$  кг/м<sup>3</sup>,  $V_r=50$  м/с.

При использовании пневмомеханических форсунок возможно добиться более высоких значений скорости топлива за счет снижения диаметра сопел форсунок. Однако уменьшение диаметра сопел приводит к повышению вероятности забивания форсунок крупными угольными частицами. Практически диаметр сопел менее 3 мм используется очень редко, т. к. исключение в исходном водоугольном топливе частиц крупнее 0,5...1 мм представляет достаточно сложную проблему.

Таким образом, качество распыления существенно зависит от диаметра сопел пневмомеханических форсунок.

С другой стороны, распыляемые струи образуют крупные дискретии угля и капли, содержащие мелкие частицы угля [3]. Таким образом, движение капель в потоке воздуха можно рассматривать как движение тела, покрытого пленкой жидкости. Согласно [5], внутри жидкой пленки, покрывающей поверхность обтекаемого тела, возникает интен-

сивное циркуляционное движение. Вследствие подвижности поверхности раздела пленка — внешняя жидкость, градиенты скоростей во внешнем потоке меньше, чем градиенты скоростей при обтекании твердой поверхности. Это приводит к уменьшению диссипации энергии во внешнем потоке и снижению сопротивления по сравнению с сопротивлением тела, покрытого отвердевшей пленкой.

С одной стороны, наличие жидкой пленки на обтекаемом теле приводит к уменьшению сопротивления, с другой стороны, пленка приводит к увеличению эффективного размера тела и росту сопротивления.

Как показали исследования, скорости потока воздуха, равные 50...60 м/с, могут обеспечить срыв влаги только с капель (угольных частиц) размером примерно 80...100 мкм. Поскольку между процессом разрушения капель жидкости и процессом срыва пленок жидкой фазы с частиц угля скоростным потоком газа прямая аналогия [6], то можно предположить, что при вышеуказанных скоростях срыва пленок жидкости с частиц угля размером меньше 80...100 мкм не будет.

Таким образом, можно утверждать, что при распылении ВУТ образуются как чисто угольные частицы («капли» крупнее 80...100 мкм), так и водоугольные капли, состоящие из тонких частиц угля и жидкой фазы.

Экспериментально распыление водоугольного топлива пневмомеханическими форсунками изучалось на специально созданном стенде.

Испытательный стенд предназначен для «холодного» опробования форсунок, оценки качества распыла ВУТ и для определения параметров форсунок (расход и давление топлива, расход и давление сжатого воздуха, дисперсность и конфигурация факела распыла).

Схема испытательного стенда включает в себя следующие элементы:

- аккумуляторную емкость с ВУТ;
- фильтр;
- насос;
- компрессор;
- систему подачи сжатого воздуха;
- систему подающего и циркуляционного трубопроводов ВУТ;
- экран с поддоном, на который производилось распыление ВУТ;
- запорно-регулирующая арматура;
- контрольно-измерительные приборы.

Распыление ВУТ производилось на экран с поддоном (рис. 2).

Конфигурация факела распыла определялась следующим образом: факел на определенном расстоянии от форсунки пересекался алюминиевой пластиной. По отпечатку на пластине определялось качество распыла.

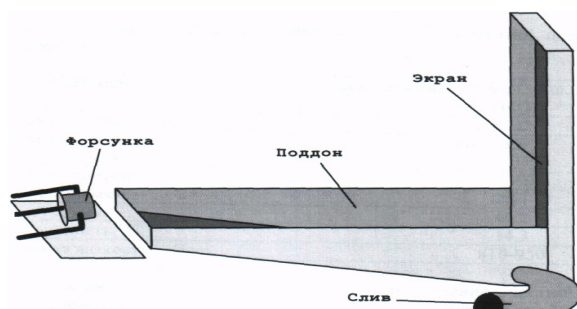


Рис. 2. Экран с поддоном для распыления ВУТ

Распыляемое водоугольное топливо имело следующие характеристики. Массовая доля твердой фазы – 57 %, вязкость при скорости сдвига  $10 \text{ с}^{-1}$  составляла  $0,6 \text{ Па}\cdot\text{с}$ , крупность частиц –  $0...355 \text{ мкм}$ .

В качестве примера на рис. 3 представлен один из таких отпечатков (цена деления –  $1 \text{ мм}$ ).

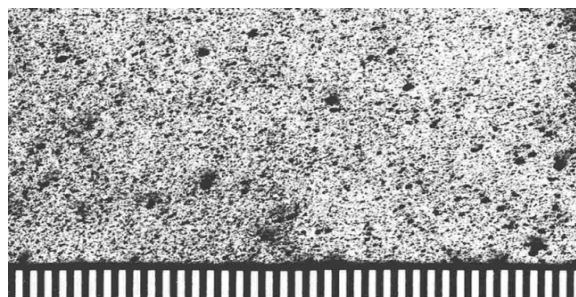


Рис. 3. Отпечаток распыла форсунки

Для анализа результатов распыления ВУТ отпечаток распыла форсунки (рис. 3) был обработан в векторном редакторе CorelDraw 9.0. В таблице показано полученное распределение капель (частиц) по размеру.

На рис. 4 показаны полученные кривые распределения.

Таблица. Распределение капель (частиц) в ВУТ

Диаметр капель (частиц), мкм	Количество капель (частиц), %
+355	7
250...355	5
160...250	17
71...160	14
–71	57

Для расчетов были использованы экспериментально полученные размеры капель (таблица) и следующие значения  $V_r=50 \text{ м/с}$ ,  $\rho=1,29 \text{ кг/м}^3$ ,  $\psi=0,2$ . В соответствии с этим, условие распада капли на более мелкие (3) выполняется для капель диаметром от 80 до 100 мкм. Таким образом, капли до 80...100 мкм представляют собой комплексные частицы, которые не распадаются на более мелкие и проходят дополнительную стадию при сжигании – испарение.

С другой стороны, укрупненные частицы угля можно рассматривать как отдельные тела, покрытые тонкой пленкой жидкости. Поскольку между процессом разрушения капель воды и процессом срыва пленок воды с зерен угля скоростным потоком газа, как было показано в работе [6], прямая аналогия, то естественно предположить, что при вышеуказанных скоростях срыва пленок влаги с комплексных частиц угля не будет.

Следуя [6], можно определить количество тепла, необходимое для испарения пленки жидкости, находящейся на комплексных частицах. Для этого первоначально нужно определить убыль массы воды с поверхности частицы шарообразной формы, свободно витающей в воздушной (газовой) среде по формуле:

$$\frac{dm}{dt} = 4\pi r_k D (c_0 - c) [1 + a (\text{Re})^{1/2}], \quad (6)$$

где  $dm/dt$  – скорость убыли массы,  $r_k$  – радиус капли,  $D$  – коэффициент диффузии,  $c_0$  – концентра-

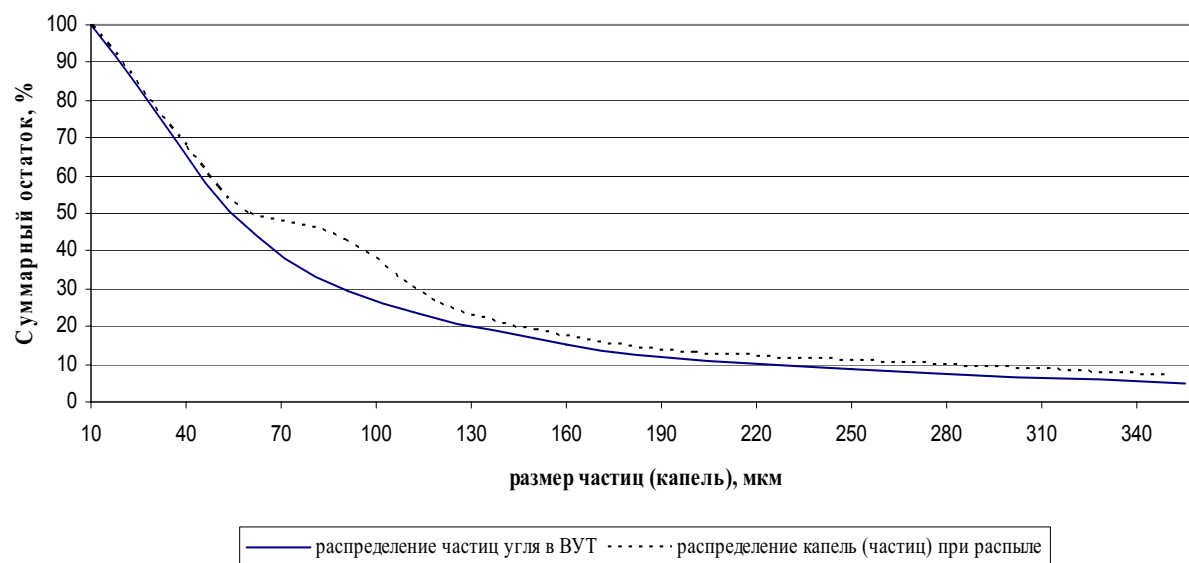


Рис. 4. Характерное распределение частиц угля в ВУТ и капель (частиц) при распыле

ция пара в окружающей среде,  $c$  — концентрация пара на поверхности пленки, находящейся на угольной частице,  $a$  — константа (0,276).

Таким образом, по результатам расчетов по формуле (6) в камере срыва могут высохнуть путем испарения влаги только частицы угля размером менее 80...100 мкм. В итоге следует, что количество тепла, требуемое для обезвоживания углей, содержащих то или иное количество тонких классов угля, будет определяться содержанием последних. Так как одновременно с испарением влаги, находя-

щейся на комплексных частицах угля, происходит испарение с поверхности других угольных частиц и водоугольных капель, то расход тепла должен быть увеличен.

Выполненные исследования подтверждают выдвинутую гипотезу о наличии двух качественно различных систем капель при распылении ВУТ. Первая система с «каплями», диаметр которых больше 80...100 мкм, представлена угольными частицами, а вторая, с диаметром частиц меньше 80...100 мкм, — водоугольными каплями.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мурко В.И. Научные основы процессов получения и эффективного применения водоугольных суспензий: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. — М., 1999. — 48 с.
2. Мурко В.И., Федяев В.И., Дзюба Д.А. Водоугольное топливо // Уголь. — 2002. — № 6. — С. 58–59.
3. Делягин Г.Н. Сжигание водоугольных суспензий — метод использования обводненных твердых топлив: Дис. ... д-ра техн. наук. — М.: ИГИ, 1970. — 32 с.
4. Хзмалян Д.М. Теория топочных процессов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 352 с.
5. Корсунов Ю.А. Экспериментальное исследование дробления капель жидкости при низких значениях чисел Рейнольдса // Механика жидкости и газа. — 1971. — № 2. — С. 182–186.
6. Грин Х., Лейн В. Аэрозоли — пыли, дымы и туманы (пер. с англ.). — Л., 1969. — 426 с.

Поступила 28.11.2007 г.

УДК 621.43

## МОДЕЛИРОВАНИЕ КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА ДВС С ОТКЛЮЧАЕМЫМИ ЦИЛИНДРАМИ

В.А. Зеер, А.А. Мартынов

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск  
E-mail: muromcev\_aleksei@mail.ru

*Предложена методика расчета силовых параметров кривошипно-шатунного механизма двигателя с отключаемыми цилиндрами. Представлены результаты математического и имитационного моделирования кривошипно-шатунного механизма на примере рядного четырехцилиндрового двигателя.*

Проблема экономии топлива автомобильными двигателями и загрязнения ими окружающей среды становится все более актуальной. Это связано, с одной стороны, быстрыми темпами роста числа потребителей, с другой, неограниченностью и невозполняемостью природных ресурсов (нефти).

Известно, что автомобильные двигатели внутреннего сгорания (ДВС) работают в основном на режимах, не требующих максимальной мощности, при этом режимы холостого хода (ХХ) в городе составляют до 35 % от общего времени [1]. Режимы ХХ и малые нагрузки являются неэффективными с позиции сгорания топлива при традиционном дросселировании, поэтому для них характерны низкий КПД и высокая концентрация продуктов неполного сгорания, в частности, СО. В этой связи метод регулирования мощности двигателя путем отключения части цилиндров на режимах частичных нагрузок и ХХ является одним из эффективных способов экономии топлива и снижения ток-

сичности отработавших газов. В зависимости от варианта реализации отключения части цилиндров двигателя, условий эксплуатации и категории автомобиля получена экономия топлива до 40 %.

На кафедре «Автомобили и двигатели» Сибирского федерального университета, г. Красноярск, был предложен способ отключения цилиндров (ОЦ), который применим к современным ДВС с искровым зажиганием [2]. Сущность способа заключается в следующем (рис. 1): в разрыв цепей между электронным блоком управления (ЭБУ) и топливными форсунками устанавливается логическое устройство, которое блокирует или пропускает сигнал без изменения от ЭБУ к форсункам в зависимости от заданного алгоритма. Такой подход позволяет реализовать различные алгоритмы ОЦ: это и постоянное отключение того или иного цилиндра, и кратковременное.

Например, для двигателя 3МЗ-406.2 с порядком работы цилиндров 1-3-4-2 исследовались следующие